

DESPLIEGUE DE SISMÓMETROS DE FONDO MARINO PARA EL ESTUDIO SÍSMICO DEL VOLCÁN CUMBRE VIEJA

Roberto CABIECES DÍAZ
Doctor en Ciencias Físicas

Sara RODRÍGUEZ MOLINA
Doctora en Ciencias Físicas



A erupción del volcán Cumbre Vieja de la isla de La Palma en septiembre de 2021 ha demostrado su poder destructivo. La explosión se caracterizó por su larga duración, de aproximadamente tres meses, y por los numerosos daños producidos en infraestructuras, edificios, agricultura e impacto en el medio ambiente.

El análisis de los fenómenos sísmicos, como el temblor o el estudio de la fuente sísmica de los terremotos producidos durante la erupción, ayuda a comprender la evolución del sistema volcánico durante los procesos de reactivación, así como en la etapa eruptiva. En este artículo se mostrarán de forma breve las técnicas de monitorización volcánica y el importante papel de los sismómetros de fondo marino, teniendo presente el despliegue de estos instrumentos llevado a cabo por el Real Instituto y Observatorio de la Armada a bordo del buque hidrográfico *Malaspina* para el estudio de la erupción del volcán Cumbre Vieja.

Introducción

Una de las piezas clave que conforma el sistema dinámico de la Tierra son los volcanes, ya sea por su interacción con la atmósfera o porque son los puntos más importantes en los que se genera nueva corteza terrestre. Más de



Figura 1. Imagen de la erupción del volcán Cumbre Vieja en la isla de La Palma.
(Fuente: <http://www.ign.es/web/ign/portall/serie-palma/galeria-de-fotografias>).
(Última entrada diciembre 2021)

una docena de ellos están normalmente activos de forma simultánea y más de 100 pueden llegar a erupcionar a lo largo de un año (Loughlin *et al.*, 2015).

Los volcanes son aberturas o conductos de ventilación donde la lava (1), la ceniza volcánica y diferentes tipos de gases entran en erupción en la superficie de la Tierra. El terreno que forman está constituido por la acumulación de lava erupcionada a lo largo del tiempo, adquiriendo una forma cónica denominada edificio volcánico. A través de una serie de grietas en su interior, la boca eruptiva se conecta a una o más áreas de almacenamiento de roca fundida o parcialmente fundida (magma). Esta conexión con el magma permite que el volcán haga erupción de forma continua hasta que este proceso deja de ser estable. En la figura 2 se muestra una ilustración con el proceso básico de formación y ascenso de magma y su posterior erupción.

(1) Magma que llega a salir a la superficie terrestre durante una erupción volcánica. El término se aplica tanto al material líquido (o semilíquido) que se expulsa durante la erupción como al material ya frío y solidificado.

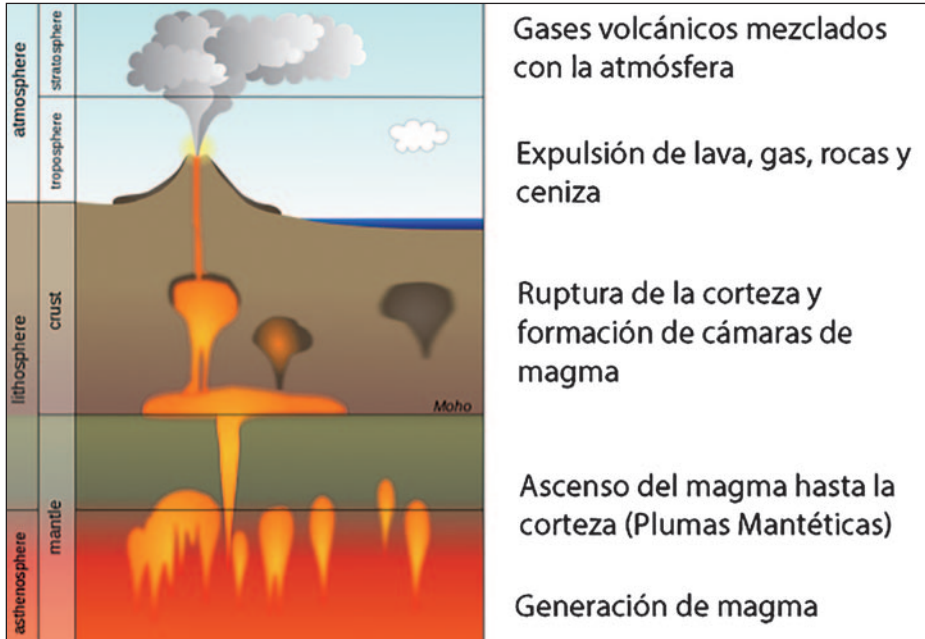


Figura 2. Esquema del proceso de ascenso de magma desde su formación en el manto. Se muestran en los paneles de la izquierda las diferentes capas de la Tierra. (Fuente: <https://www.usgs.gov/programs/VHP/about-volcanoes>). (Última entrada diciembre 2021)

Las manifestaciones volcánicas en España se distribuyen en la zona de Olot (en la parte oriental del Pirineo), golfo de Valencia (con volcanismo tanto costero como submarino), zona sureste (la más importante, entre el cabo de Gata y Cartagena y la isla de Alborán), la submeseta sur (Campo de Calatrava en La Mancha) y en el archipiélago canario. De entre estas zonas, suscita especial interés el archipiélago canario por su alta y reciente actividad. Aunque varios modelos volcánicos han sido propuestos para describir el emplazamiento y evolución de la formación del archipiélago —como el de plumas mantélicas de Morgan *et al.* (1971) o el modelo unificador de Anguita y Hernán (2000)—, ninguno lo ha podido representar completamente con éxito.

Durante las últimas décadas se han sucedido varios episodios de erupciones volcánicas en el archipiélago canario, como la del Teneguía en octubre de 1971, la de un volcán submarino de la isla de El Hierro en 2011-2012 y la más reciente del Cumbre Vieja en La Palma en 2021. Estas son las islas más jóvenes del archipiélago, teniendo actividad desde hace unos cuatro millones de años. La Palma está compuesta por dos unidades volcánicas: una grande en el

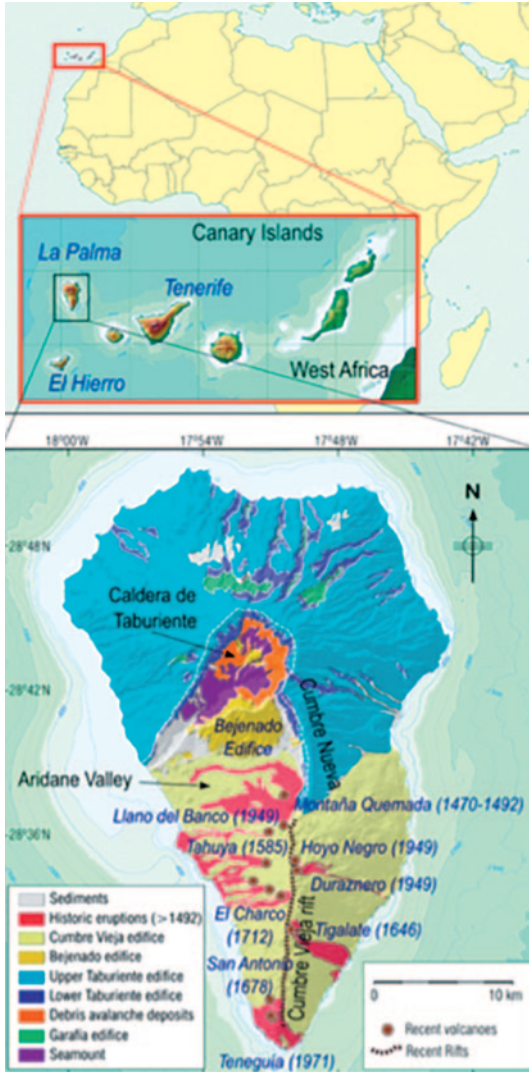


Figura 3. Localización geográfica del archipiélago canario y de la isla de La Palma (panel superior) y mapa geológico simplificado (panel inferior).
(Fuente: Fernández *et al.*, 2021)

norte, con morfología circular y un rift volcánico (2), y el Cumbre Vieja, en el sur de la isla (figura 3). La de la zona norte de la isla es el resultado de la superposición de varios edificios volcánicos: tres en superficie y uno submarino (a 4.000 m de profundidad). Los tres volcanes en superficie son el Garafía, el Taburiente-Cumbre Nueva y el Bejenado (Fernández *et al.*, 2021). El rift volcánico del Cumbre Vieja tiene una orientación norte-sur, con una longitud de 17 km, extendiéndose por el lecho marino. En la figura 3 se muestra el rift y las erupciones acontecidas en este volcán durante los últimos 500 años.

Vigilancia volcánica

La gran mayoría de las erupciones volcánicas vienen precedidas por procesos de reactivación causados por la interacción del magma en su ascenso hacia la superficie terrestre con la roca circundante y por la expulsión de gases por enfriamiento y descompresión de magma en su interior. Estos procesos generan sismicidad, deformaciones del terreno, emisión de gases, cambios de temperatura,

(2) Conjunto de fisuras en el volcán que siguen una alineación determinada y por las que se expulsa lava.

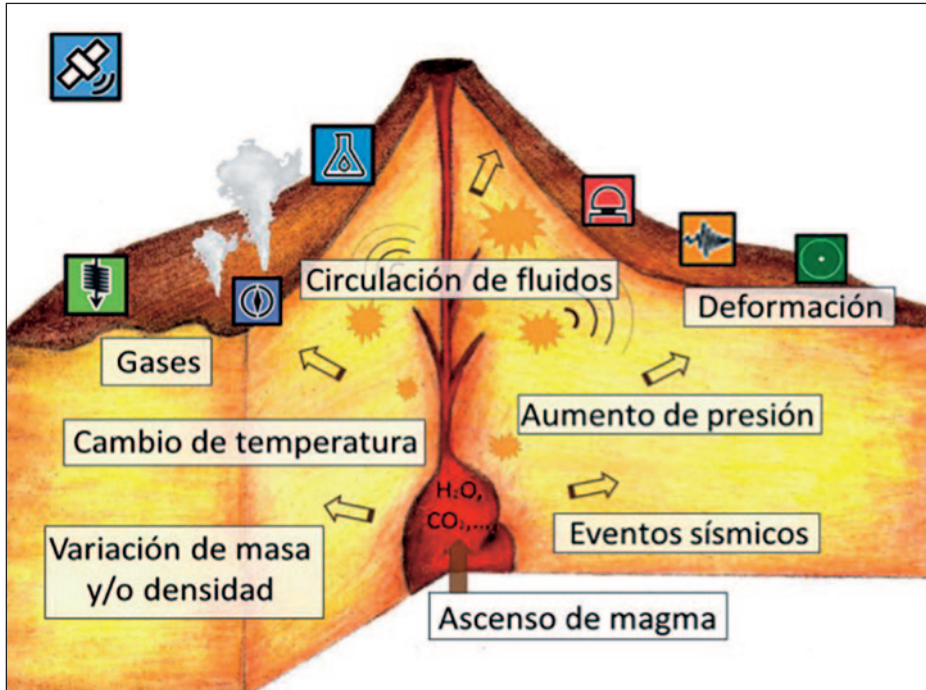


Figura 4. Esquema general de los procesos volcánicos y las técnicas de monitorización volcánica (IGN). (Fuente: www.ign.es)

episodios fumarólicos, deslizamientos y variaciones de gravedad (Phillipson *et al.*, 2013; Fernández *et al.*, 2015; Torres-González *et al.*, 2020) que se pueden observar sobre la superficie terrestre.

En general, se considera que las erupciones volcánicas ocurren cuando la tensión en una zona de acumulación de magma supera el límite de fractura de la roca encajante. Esta acumulación de tensión se debe al aumento de la presión principalmente por la inyección de nuevo material en la zona de acumulación y la exsolución de volátiles (3) (Tarbuck *et al.*, 2005; Bonafede y Ferrari, 2009).

La vigilancia volcánica se lleva a cabo fundamentalmente a través de la monitorización de deformaciones de la superficie y de la monitorización de actividad sísmica (figura 4).

(3) El vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂) y el dióxido de azufre (SO₂) son los gases disueltos (volátiles) más comunes dentro del magma. Estos están confinados debido a la gran presión ejercida por las rocas suprayacentes (presión de confinamiento), de igual forma a como se conserva el CO₂ en los refrescos. Los volátiles formarán parte del magma hasta que,

Los Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS) y la Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR) son las herramientas más utilizadas en la vigilancia de deformaciones del terreno. La técnica InSAR (figura 5) ha revolucionado los estudios de deformación volcánica, ya que dadas sus características presenta una gran capacidad para la observación rutinaria de zonas remotas y de difícil acceso (Biggs y Pritchard, 2017). La combinación de

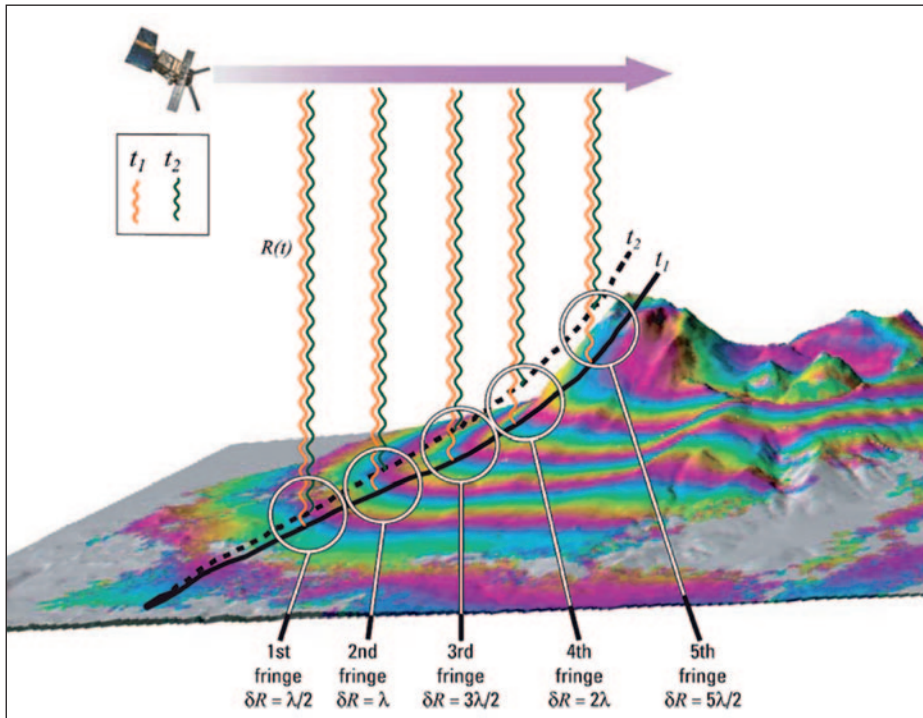


Figura 5. Patrón espacial dado por la Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR) —tras eliminar los efectos de tierra plana y topografía del terreno— debido a un proceso de inflación volcánica, ante el cual el interferograma radar presenta franjas concéntricas. Cada cambio de media longitud de onda produce una franja de interferencia completa que se proyecta como un espectro de colores —en este ejemplo, del rojo al violeta— en el interferograma. La deformación captada en el interferograma corresponde con la línea de visión del satélite. (Fuente: Dzurisin y Lu, 2007)

al aproximarse a la superficie, el magma alcance una ambiente de baja presión o hasta que la masa de magma cristalice, momento en el cual se producirá la exsolución de gases, es decir, la migración de estos hacia la superficie. La exsolución y subsecuente expansión de los gases en los sistemas magmáticos pueden causar erupciones volcánicas explosivas.

ambos procedimientos geodésicos permite obtener las ventajas asociadas a la alta cobertura espacial dada por los datos InSAR y a la alta cobertura temporal del GNSS (Rodríguez-Molina *et al.*, 2021). Por su parte, la detección y análisis de la actividad sísmica proporciona información muy importante sobre la evolución del proceso de reactivación, así como del movimiento de fluidos magmáticos. Otras técnicas que se usan para la monitorización volcánica son la observación de las anomalías gravimétricas y geoquímicas que permiten detectar intrusiones de magma (Torres-González *et al.*, 2020).

Así, por ejemplo, en la erupción de El Hierro en 2011-2012 se llegaron a medir deformaciones de hasta 10 cm, y en la del Cumbre Vieja en 2021 se detectaron cientos de terremotos pequeños (Magnitud < 3,5) previos a la erupción. Cuatro días antes, el terreno se elevó 10 centímetros en la zona y en la víspera más de 15. Las imágenes InSAR de la erupción del Cumbre Vieja entre el 14 y el 20 y el 16 y el 22 de septiembre (IGME-CSIC) mostraron

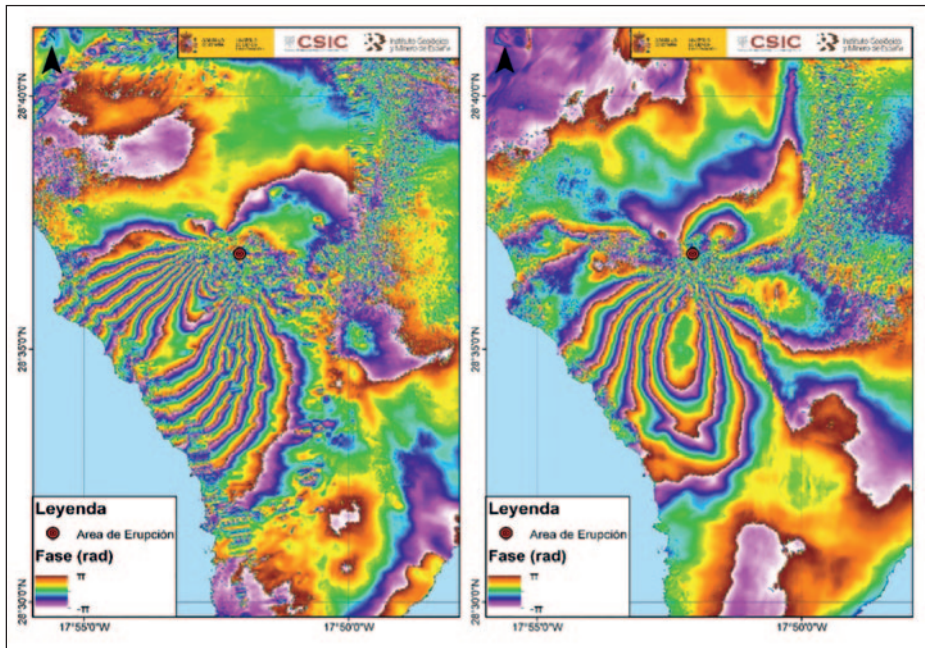


Figura 6. Interferogramas diferenciales en geometría ascendente entre el 14 y el 20 de septiembre de 2021 (panel izquierdo) y descendente entre el 16 y el 22 del mismo mes (panel derecho) realizados con imágenes del Copernicus Sentinel-1. Los resultados pueden contener señales atmosféricas. Elaborado por el laboratorio de radar y modelización de riesgos geológicos del IGME (Geohazards InSARlab, IGME-CSIC) en colaboración con el Departamento de Observación de la Tierra de la División de Geomática del CTTC.

(Fuente: <https://info.igme.es>)

patrones interferométricos asociados con procesos producidos en diques (dislocaciones) (figura 6). El sentido negativo (colores con gradiente hacia el blanco) de las franjas indica acercamientos del terreno al satélite, mientras que las zonas con sentido positivo presentan alejamientos del mismo. Cada franja de color completa representa un movimiento del terreno relativo al satélite de $\sim 2,8$ centímetros.

Entre los peligros asociados a las erupciones volcánicas se encuentran los flujos de lava, lahares (o flujos de lodo), columnas de ceniza, avalanchas, flujos piroclásticos, gases volcánicos y lluvia ácida, así como el riesgo de tsunamis producidos por deslizamiento de flancos del volcán sobre el mar.

A continuación nos centraremos en el análisis de la sismicidad durante el proceso eruptivo del Cumbre Vieja en 2021 y se mostrará en detalle el despliegue de sismómetros de fondo marino que se llevó a cabo para su estudio.

Análisis de la sismicidad y estructura del Cumbre Vieja

Como se ha mencionado en la introducción, una de las evidencias de los procesos de reactivación volcánica son los terremotos. La erupción del Cumbre Vieja comenzó el 19 de septiembre; sin embargo, previamente ya habían ocurrido cientos de terremotos de pequeña a moderada magnitud ($< 3,5$). En la figura 7 se muestra la evolución temporal de estos terremotos y cómo se desplazaron en dirección oeste-este aproximadamente cinco kilómetros. En segundo lugar, también se observa cómo su profundidad evolucionó de terremotos superficiales (profundidad < 5 km) a terremotos superficiales acompañados de otros de profundidad intermedia (10 km $<$ profundidad < 30 km), debido a posibles cambios de presión en la cámara magmática del volcán. Sin embargo, estas profundidades han sido estimadas con grandes incertidumbres y no es posible obtener conclusiones fiables de la evolución en profundidad de los terremotos asociados a la erupción.

En este punto surge la discusión de la precisión o el error asociados a la localización hipocentral (4) de estos terremotos, que depende en gran medida de la distribución geográfica de las estaciones sísmicas. Esto es debido a que los algoritmos que se utilizan para buscar el origen de la fuente sísmica suelen utilizar los tiempos de llegada de las fases sísmicas. Por tanto, si únicamente se dispone de estaciones sísmicas muy próximas situadas sobre la posible fuente del terremoto (en La Palma) pero no bien distribuidas en distancia y

(4) Determinación de los parámetros focales de un evento sísmico (latitud, longitud, profundidad y tiempo origen).

acimut alrededor del epicentro (5), provocará una gran ambigüedad en las soluciones del algoritmo de búsqueda del origen de la fuente sísmica (Lomax *et al.*, 2005).

Además de la localización hipocentral de los terremotos asociados a la erupción volcánica, también es interesante conocer su mecanismo focal, que ofrece información de la orientación de los planos de la falla que dieron lugar al terremoto y nos dirá cómo ha sido el proceso de ruptura (Udías *et al.*, 2018), así como una estimación de la magnitud y profundidad del terremoto.

Por otra parte, es interesante conocer la estructura interna de un volcán para intentar comprender el cómo y el porqué de las erupciones. Para el estudio de la estructura interna del Cumbre Vieja, se pueden utilizar técnicas de inversión, como la de tiempos de recorrido de ondas internas, ya utilizadas en la erupción de El Hierro (García-Yeguas *et al.*, 2014) para revelar imágenes de la Tierra en 3D, con lo que se obtiene un modelo de velocidad de ondas sísmicas que puede mostrar interesantes anomalías en la estructura del volcán, como intrusiones magmáticas o zonas de alta densidad por acumulación de rocas ígneas.

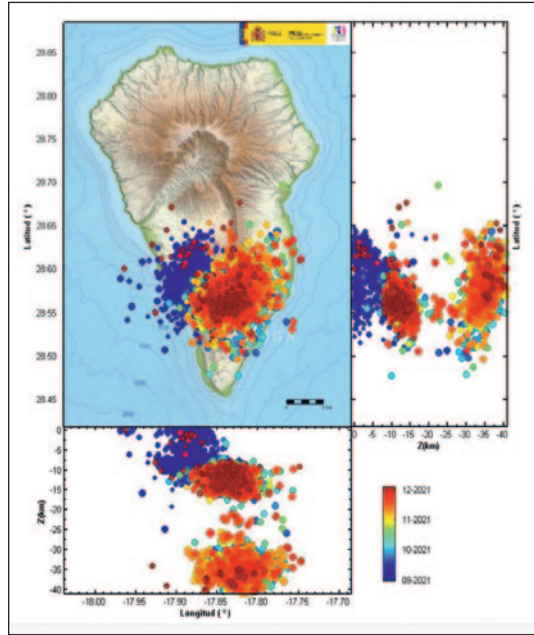


Figura 7. Evolución temporal de la sismicidad durante el proceso eruptivo de La Palma.

(Foto: www.ign.es)

Despliegue de sismómetros de fondo marino (OBS) para el estudio del volcán Cumbre Vieja

El 9 de noviembre del 2021 el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) desplegó dos sismómetros de fondo marino (OBS, por sus siglas en inglés) (figura 8) a bordo del buque hidrográfico *Malaspina* para el estudio sísmico de la erupción del Cumbre Vieja en la isla de La Palma. Para hacerlo

(5) Proyección de las coordenadas geográficas de un hipocentro en superficie.

posible se contó con el apoyo del Instituto de Ciencias del Mar (ICM-CSIC). La campaña marina estuvo coordinada con el despliegue de estaciones sísmicas en tierra llevado a cabo por el Instituto Geográfico Nacional, responsable de la alerta volcánica en España.

Los OBS que actuaron en La Palma pertenecen a la Red FOMAR, constituida por el ROA y la Universidad Complutense de Madrid y conformada por cinco OBS de banda ancha. Únicamente se pudieron desplegar dos de los equipos de la Red FOMAR, ya que el resto actualmente están fondeados en otro experimento científico (Proyecto UPFLOW) en las Azores y en Madeira.

Los OBS fueron dispuestos uno a 30 km del volcán (3.600 m de profundidad) al suroeste y el otro a 25 km (2.600 m) al sureste. En la figura 9 se señalan estas localizaciones con cuadrados rojos.

El estudio de la fuente sísmica (localización de terremotos y mecanismos focales) de los terremotos ocurridos en el volcán durante la erupción se puede mejorar en gran medida gracias a la aportación de las observaciones de los OBS (Cabececes *et al.*, 2020). Estos instrumentos permitirán obtener los parámetros de la fuente sísmica con mayor precisión. Por ejemplo, relocalizar los terremotos y estimar con menor incertidumbre su magnitud. Además, las conclusiones ayudarán a conseguir con menor error la orientación de los planos de falla de los terremotos de mayor magnitud. Una de las aportaciones adicionales es la de realizar una tomografía sísmica, es decir, un modelo 3D de velocidad de las ondas sísmicas de la corteza y el manto bajo el volcán, con

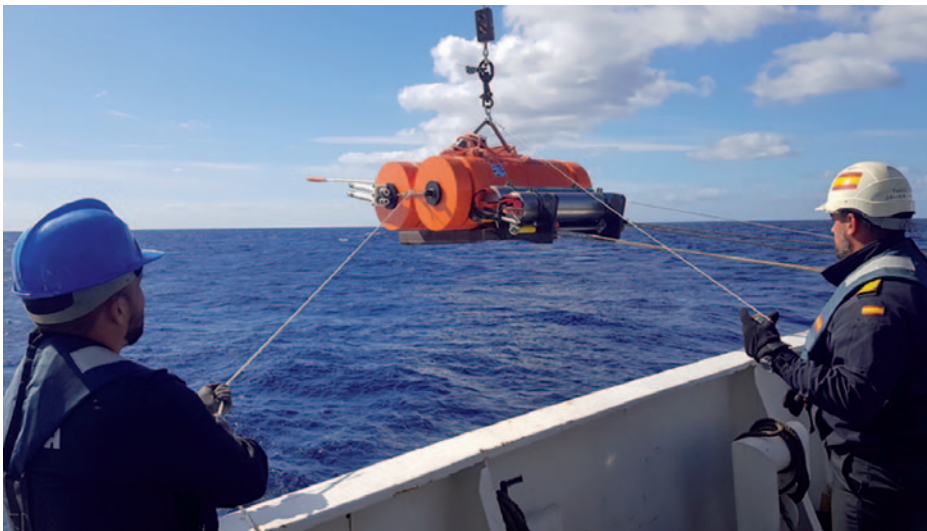


Figura 8. Foto del despliegue del OBS 02 a bordo del *Malaspina*.
(Foto: Cristian Pérez Varela)

una cobertura más amplia y con un nivel de detalle mayor del que se obtiene únicamente con estaciones en tierra.

Señales sísmicas de origen volcánico

El análisis de las diferentes señales sísmicas asociadas a la actividad volcánica permite determinar movimientos del magma en el interior del volcán. Las fracturas en la corteza debido a la presión del magma ascendente suelen dar origen, entre otro tipo de terremotos, a los volcano-tectónicos.

Una de las mayores dificultades que existen cuando se intenta detectar terremotos es filtrar el ruido (ruido oceánico) o, como en el caso de este estudio, localizar los sumergidos en el tremor volcánico (6).

En la figura 10 se muestra un ejemplo de un terremoto detectado por una estación sísmica situada en La Palma dentro del tremor generado por el Cumbre Vieja en la erupción del 2021 y que solo es apreciable un vez filtrada la señal sísmica convenientemente. En el sismograma (figura 10a) no se observa aparentemente ningún terremoto; sin embargo, si se estima el espectrograma (figura 10b), es posible descubrir una anomalía energética en el rango de frecuencias [5 – 40] Hz dentro de la zona sin sombrear (figura 10b). Con esta información se puede tomar una ventana de tiempo que contenga el terremoto y filtrar la señal. De este modo, se obtiene un sismograma filtrado en el que sí se observa el terremoto (figuras 10c y 10d).

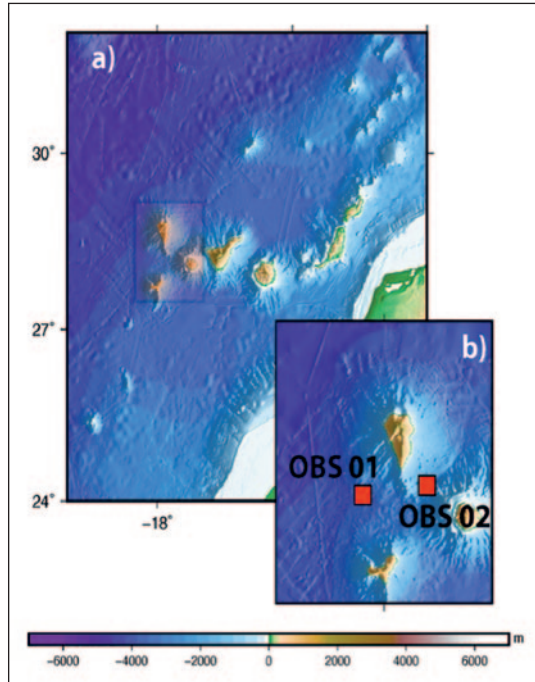


Figura 9. Posición geográfica de los sismómetros de fondo marino: a) mapa archipiélago canario y b) posición geográfica del despliegue de los OBS

(6) Señal sísmica caracterizada por mantener una amplitud relativamente constante durante un período de tiempo que puede ir desde unos minutos a meses. Su contenido espectral puede ser carácter monocromático (centrado alrededor de una frecuencia determinada) o de amplio espectro, alcanzado frecuencias incluso superiores a seis hercios.

En resumen, uno de los problemas en el análisis de los registros de la erupción volcánica es obtener una buena estimación del instante en el que llega el terremoto a la estación sísmica. Aunque esto se puede realizar de forma manual (con mucha dificultad), como se mostró en el ejemplo, sería deseable investigar en el desarrollo de un método para facilitar la detección de señales sísmicas contaminadas por el temblor.

Además del análisis de las señales utilizando filtros para aumentar su detectabilidad, es común usar antenas sísmicas o *arrays* para el estudio de señales volcánicas (Almendros *et al.*, 1997). Los *arrays* además pueden ser diseñados para ser utilizados con OBS y poder registrar señales sísmicas desde el océano (Krüger *et al.*, 2020; Cabieces *et al.*, 2020). Un *array* es un conjunto de sensores distribuidos geoméricamente, de tal forma que las señales registradas se parecen entre ellas. De esta forma, al sumar todas estas señales se puede determinar una única señal con una gran reducción del ruido. Además, permite obtener el acimut y la velocidad con que el frente de onda atraviesa el *array*. Estas capacidades confieren a los *arrays* sísmicos una gran importancia como herramienta para detectar y localizar terremotos en crisis volcánicas.

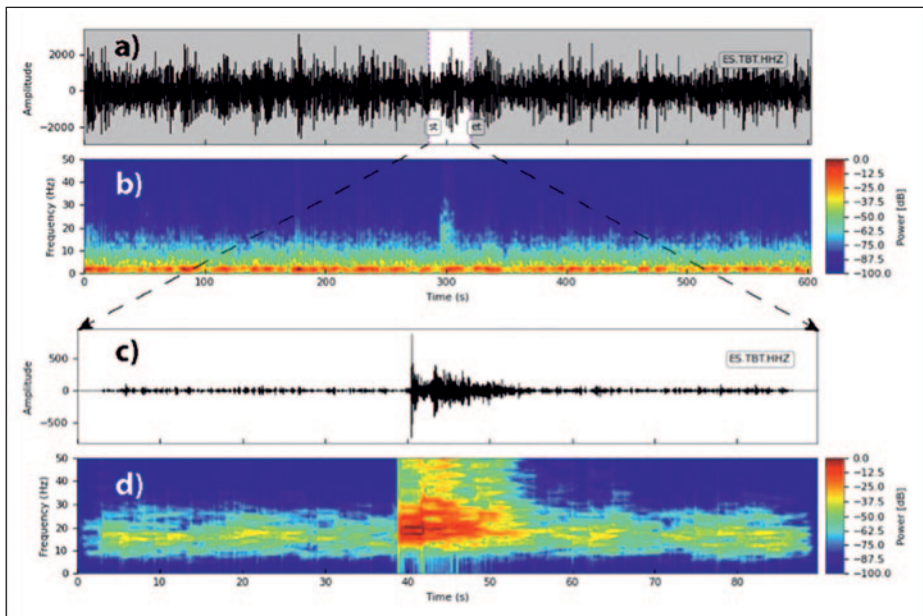


Figura 10. Registro en la componente vertical en la estación TBT (Taburiente) —situada en el Barranco de las Angustias, El Paso (La Palma)— del temblor generado por el volcán Cumbre Vieja en la erupción del 2021: a) temblor; b) espectrograma del temblor; c) temblor recortado y filtrado por debajo de ocho hercios, y d) espectrograma del temblor recortado y filtrado

Conclusiones

La erupción del Cumbre Vieja ha supuesto una oportunidad única para el estudio y análisis de un proceso eruptivo en un volcán. Para ello se contará con la aportación de datos procedentes de sismómetros de fondo marino, que serán clave para reducir la incertidumbre de los parámetros focales de los terremotos asociados a la erupción y para realizar un amplio estudio de la estructura de la corteza y el manto superior bajo el volcán.



BIBLIOGRAFÍA

- ALMENDROS, J.; IBÁÑEZ, J. M.; ALGUACIL, G.; DEL PEZZO, E.; ORTIZ, R. (1997): «Array tracking of the volcanic tremor source at Deception Island, Antarctica». *Geophysical Research Letters*, 24(23), pp. 3.069-3.072.
- ANGUITA, F.; HERNÁN, F. (2000): «The Canary Islands origin: a unifying model». *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103(1-4), pp. 1-26.
- BIGGS, J.; PRITCHARD, M. (2017): «Global Volcano Monitoring: What Does It Mean When Volcanoes Deform?». *Elements* 13, 17–22. <https://doi:10.2113/gselements> (13-1-2017).
- BONAFEDE, M.; FERRARI, C. (2009): «Analytical models of deformation and residual gravity changes due to a Mogi source in a viscoelastic medium». *Tectonophysics*, 471(1-2), pp. 4-13.
- CABIECES, R.; BUFORN, E.; CESCA, S.; PAZOS, A. (2020): «Focal parameters of earthquakes offshore Cape St. Vincent using an amphibious network». *Pure and Applied Geophysics*, 177(4), pp. 1.761-1.780.
- CABIECES, R.; KRÜGER, F.; GARCÍA-YEGUAS, A.; VILLASEÑOR, A.; BUFORN, E.; PAZOS, A.; OLIVAR-CASTAÑO, A.; BARCO, J. (2020): «Slowness vector estimation over large-aperture sparse arrays with the Continuous Wavelet Transform (CWT): application to Ocean Bottom Seismometers». *Geophysical Journal International*, 223(3), pp. 1.919-1.934.
- DZURISIN, D.; LU, Z. (2007): «Interferometric synthetic-aperture radar (InSAR)». *Volcano Deformation* (Springer Praxis Books, Springer, Berlin, Heidelberg), https://doi.org/10.1007/978-3-540-49302-0_5.

- FERNÁNDEZ, J.; GONZÁLEZ, P. J.; CAMACHO, A. G.; PRIETO, J. F.; BRÚ, G. (2015): «An Overview of geodetic volcano research in the Canary Islands». *Pure and Applied Geophysics*, 172, pp. 3.189–3.228.
- FERNÁNDEZ, J.; ESCAYO, J.; HU, Z.; CAMACHO, A. G.; SAMSONOV, S. V.; PRIETO, J. F.; ANCO-CHEA, E. (2021): «Detection of volcanic unrest onset in La Palma, Canary Islands, evolution and implications». *Scientific Reports*, 11(1), pp. 1-15.
- GARCÍA-YEGUAS, A.; IBÁÑEZ, J. M.; KOULAKOV, I.; JAKOVLEV, A.; ROMERO-RUIZ, M. C.; PRUDENCIO, J. (2014): «Seismic tomography model reveals mantle magma sources of recent volcanic activity at El Hierro Island (Canary Islands, Spain)». *Geophysical Journal International*, 199(3), pp. 1.739-1.750.
- KRÜGER, F.; DAHM, T.; HANNEMANN, K. (2020): «Mapping of Eastern North Atlantic Ocean seismicity from Po/So observations at a mid-aperture seismological broad-band deep sea array». *Geophysical Journal International*, 221(2), pp. 1.055-1.080.
- LOMAX, A. (2005): «A reanalysis of the hypocentral location and related observations for the great 1906 California earthquake». *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(3), pp. 861-877.
- LOUGHLIN, S. C.; SPARKS, R. S. J.; SPARKS, S.; BROWN, S. K.; JENKINS, S. F.; VYE-BROWN, C. (eds.) (2015): «Global volcanic hazards and risk». *Cambridge University Press*.
- MORGAN, W. J. (1971): «Convection plumes in the lower mantle». *Nature*, 230(5288), pp. 42-43.
- PHILLIPSON, G.; SOBRADELO, R.; GOTTMANN, J. (2013): «Global volcanic unrest in the 21st century: An analysis of the first decade». *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 264, pp. 183–196. .08.004
- RODRÍGUEZ-MOLINA, S.; GONZÁLEZ, P. J.; CHARCO, M.; NEGREDO, A. M.; SCHMIDT, D. A. (2021): «Time-Scales of Inter-Eruptive Volcano Uplift Signals: Three Sisters Volcanic Center, Oregon (United States)». *Frontiers in Earth Science* 8, 645. [https://doi:10.3389/feart.2020.577588](https://doi.org/10.3389/feart.2020.577588)
- TARBUCK, E. J.; LUTGENS, F. K.; TASA, D.; TASA, D. (2005): *Earth: an introduction to physical geology*, p. 744. Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall.
- TORRES-GONZÁLEZ, P. A.; LUENGO-OROZ, N.; LAMOLDA, H.; D’ALESSANDRO, W.; ALBERT, H.; IRIBARREN, I.; MOURE-GARCÍA, D.; SOLER, V. (2020): «Unrest signals after 46 years of quiescence at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands». *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 392, 106757.
- UDIAS, A.; BUFORN, E. (2018): «Principles of seismology». *Cambridge University Press*.